引用格式：杨世琦, 颜鑫. 基于生物地球化学循环视角下我国农业碳达峰、碳中和应对策略. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 435-443, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220509005.
Yang S Q, Yan X. Strategies for achieving agriculture carbon peak and carbon neutrality in China based on view of biogeochemical cycle. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 435-443, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220509005. (in Chinese)

基于生物地球化学循环视角下我国农业碳达峰、碳中和应对策略

杨世琦* 颜 鑫

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081

摘要 生物地球化学循环是物质（元素）在大气圈、水圈、生物圈与岩石圈之间流动的根本理论，对实现国家碳达峰、碳中和目标有重要指导作用。农业作为基础产业对大气温室效应的时空尺度较大，农业碳达峰、碳中和值得关注和重视，以服务于国家碳达峰、碳中和发展总体战略。文章基于生物地球化学循环视角和农业碳达峰、碳中和释义，分析了农业碳达峰、碳中和路径，从农业碳达峰面临挑战、农业碳中和面临挑战、农业碳中和潜力分析、农业碳中和误区及生物圈减排的重要性等5个方面进行了深入思考，并从农业碳达峰、农业碳中和与科技创新3个方面提出我国农业碳达峰、碳中和的应对策略。

关键词 生物地球化学循环，农业碳达峰，农业碳中和，应对策略

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220509005

联合国政府间气候变化专门委员会评估结果表明，大气二氧化碳（CO_2）体积分数由1860年285 ppm增加至2020年414 ppm[1]，全球海陆表面平均温度升高了1.09℃[2]；预测21世纪末大气CO_2浓度将达到730—1 000 ppm，可能使全球表面平均温度上升1.0°C—3.7°C[3]。2015年《巴黎协定》指出“把全球平均气温较工业化前水平升高控制在2℃之内，并为把升温控制在1.5℃之内而努力”[4]。然而，预测2030—2052年间全球平均地表升温幅度就达到1.5°C[5]。人类活动加剧和加快了大气温室效应。

国家或地区通常是分配排放责任的单元。欧盟在1980年前后、美国在2005年前后分别实现碳达峰[6]。2020年9月22日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布，中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。截至2021年全球已有54个国家实现碳达峰，近期碳中和成为应对气候变化的热点。近130个国家和地区提出实现碳中和目标，如乌拉圭2030年、芬

*通信作者
资助项目：“十四五”宁夏回族自治区重点研发计划（2019BBF02007）
修改稿收到日期：2022年7月1日

兰2035年、冰岛与奥地利2040年、瑞士2045年、中国2060年。英国农业联盟于2019年宣布英格兰和威尔士地区将在2040年实现农业碳排放“净零”[7]。

碳达峰是指化石燃料使用产生的CO_2排放量达到峰值；碳中和是指化石燃料使用及土地利用变化产生的碳排放量，通过陆海生态系统吸收及其他技术方式固存的碳量之间达到平衡，即CO_2净排放为零[8]。基于国家尺度碳达峰和碳中和（以下简称“双碳”），是以国家为单元将全球低碳发展应尽承担责任进行分割，在相互协作与监督机制下，促进各国加快探索低碳发展模式，并尽早实现目标。由于国家禀赋资源条件、社会基础、发展阶段、产业结构与人文理念存在较大差异，推进“双碳”目标将各不相同，因此，不同的国家或地区，制定符合各自国情的实施措施，才能推动“双碳”发展。农业对国家“双碳”发展具有重要的支撑作用，以生物地球化学循环（biogeochemical cycle）理论为指导，在深度分析农业碳循环的基础上，结合中国实际情况，提出农业“双碳”应对策略，为我国农业绿色低碳发展提供理论依据。

1 生物地球化学循环视角下的碳循环

简单来说，生物地球化学循环是组成生命的化学元素从环境进入生物体，再从生物体返回环境的循环过程。由于碳是构成一切有机物的基本元素，所以碳循环是最重要生物地球化学循环：通过光合作用植物将大气CO_2合成碳水化合物，把太阳能转化为化学能，沿食物链表现为转化、传递与分解，并最终以CO_2返还大气。随着工业革命后采矿等工业飞速发展和能源大量使用，岩石圈碳转化释放的CO_2数量增多与大气CO_2浓度增加，导致全球温室效应。由此可见，通过生物、物理或化学等途径转化大气CO_2为稳定性强的生物碳或其他碳材料，或转入土壤或海洋或岩石圈深层密封储存，才能够有效降低大气CO_2。

基于生物地球化学循环视角的碳循环模型如图1所示。大气CO_2浓度的相对稳定对生物圈至关重要。从泥盆纪生物在地球上大量出现以来，生物地球化学循环保持了CO_2不断产生和氧气（O_2）不断消耗过程的相对稳定性。早期的CO_2是火山喷发和碳酸盐岩石风化产生量与植物光合固定量基本相当，年通量大约为3亿吨，是大气CO_2总量（2.4万亿吨）的0.01%，才使得大气CO_2保持稳定。否则，每经过1万年，大气CO_2就要增加1倍；氧化过程消耗与光合作用释放的氧气量也基本相当，才使得大气O_2基本稳定，否则，经过400万年，大气的O_2将消耗殆尽[9]。从早期大气CO_2保持稳定可以推断，碳地质大循环在陆地、海洋与大气之间处于相对平衡状态，碳在三大库的净积累为零或近似零（年际波

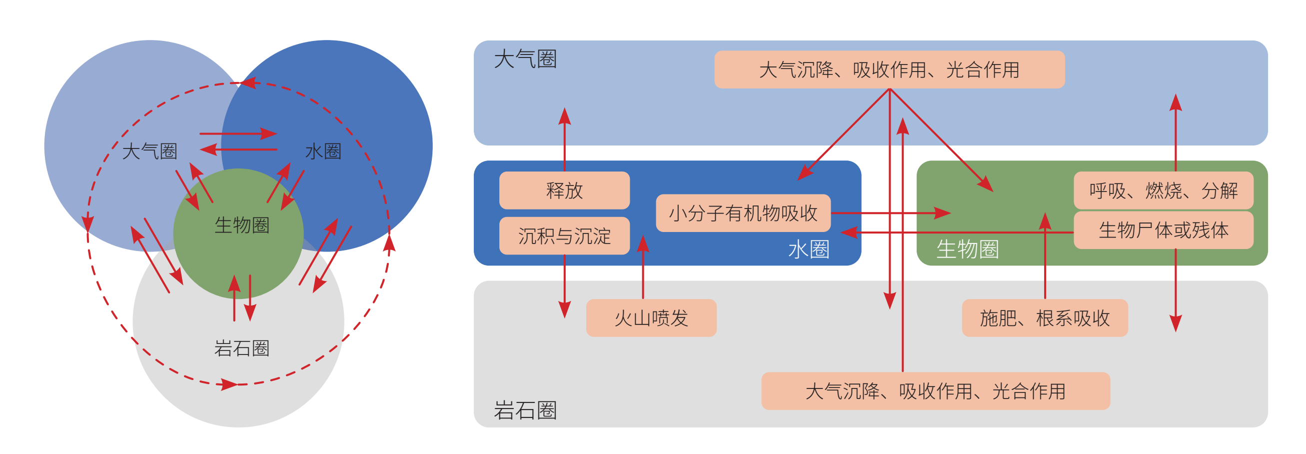


图1 基于生物地球化学循环视角的碳循环模型及循环路径
Figure 1 Carbon recycle model and routes based on biogeochemical cycle

动），作为碳“转换器”的生物圈基本稳定，即净收支为零。工业革命影响了全球碳循环，大气CO_2浓度显著升高，也相应激发了陆地与海洋自然碳汇增加，这也是生物圈目前表现为碳汇的根本原因；未来将达到峰值，重新建立陆地、海洋与大气的碳循环新平衡体系，生物圈碳汇再次归零，大气CO_2浓度也将再次保持稳定。届时，大气CO_2浓度是否能达到人类期望的那样回归到工业革命前状态，将存在较大的不确定性。为此，依照生物地球化学循环原理，通过控制化石能源与调整能源结构，促进人工碳汇和强化自然碳汇，持续推动“双碳”深入实施将成为全人类可持续发展的重大使命。

2 农业碳达峰、碳中和的释义与路径

2.1 农业碳达峰、碳中和的释义

碳达峰、碳中和概念在三大产业及其行业与部门表现出较强的亲和力，衍生了很多非严格意义上的二级概念或子概念。农业是人类社会与自然生态系统高度融合的产物，是最为基础和最重要的产业，农业碳达峰、碳中和与人类社会发展息息相关。具体来讲，农业碳达峰是农业生产使用化石燃料导致CO_2排放量达到峰值（广义农业或大农业，包括农林副牧渔）；农业碳中和是农业化石燃料及农业用地导致的碳排放量，与陆海生态系统吸收及采用固碳技术封存碳量之间达到平衡，即农业CO_2净排放为零。农业碳达峰主要涉及两部分：第一部分是使用化石能源排放，农业生产活动过程中用电与农业机械等产生CO_2，如农业设施、灌溉、耕地、播种、施肥、收获、仓储及加工，还包括肥药、地膜等生产资料生产运输、农产品流动及农机制造；第二部分是农田土壤耕作、农作物与家畜家禽生产过程中排放的CO_2、甲烷（CH_4）和一氧化二氮（N_2O）等温室气体。农业碳中和也涉及两部分：第一部分是陆海生态系统的自然途径，包括陆地、海洋植物光合作用以及海水吸收等，将大气圈CO_2转入生物圈与水圈；另一部分是碳封存人工途径，如有机碳深埋、密封、或转化为生物炭等。

2.2 农业碳减排与碳固定途径

2.2.1 农业碳减排途径

化石能源途径碳减排是通过降低农业生产过程中化石能源消耗和提高能源利用效率，减少CO_2产生，并达到峰值。全世界人类活动产生CO_2年排放量约390亿吨，我国约100亿吨。2020年全球化石能源消耗CO_2排放占总量的75%，大气CO_2新增18亿吨[10]。农业碳减排途径包括：① 构建低碳农业模式。升级农业基础设施与生产装备，促进节能降耗；发展替代能源，减少化石能源的消耗。② 促进电能驱动农机。发展电动农业机械，提高农事与加工环节的绿色能源比例。③ 农业生产资料升级创新。提升肥药、农膜等工艺水平，创制低碳农资，建立低碳供应链与产业链体系。④ 建立具有农产品减损与能源减耗特征的低碳运输链与低碳农业贸易体系。

温室气体排放碳减排主要涉及土壤耕作、施肥、灌溉和喷药等农业生产环节，以减少温室气体排放。减排途径包括：① 适度扩大少免耕与休耕比例。欧盟设置农田生态区（大于15公顷农田必须保留5%农田生态区）以促进减排。② 发展有机农业和生态农业，降低肥药投入。欧盟提出2030年有机农业面积至少达到农业土地总面积的25%，英国提出农田自然修复和恢复泥炭地的计划，英国计划2050年将20%的农业用地转为自然修复和提出“千分之四土壤增碳计划”促进土壤固碳[11]。③ 秸秆等有机废弃物还田、控制肥药施用量，以及增加有机肥料替代比例。④ 稻田采用旱直播、间断灌水、晒田与旱栽等途径能够减少CH_4排放。⑤ 发展精准农业，采用“3S”（遥感、全球定位系统和地理信息系统）、智能农机、物联网与互联网等手段，实时监测，肥药水精确施用，以最少的资源投入与最有效的农事作业，换取最大产量收益和最少的碳排放。

2.2.2 农业碳固定途径

农业碳固定涉及自然与人工两方面。自然途径碳固定包括：① 保护和扩大绿色植被面积，合理采伐木材与适度放牧。全球森林碳储量 8 610 亿吨[12]，草地碳储量约为 5 200 亿吨[13]。② 保护海洋和海陆过渡带，维护海洋生态健康安全。海洋储存了全球约 93 % 的 CO_2，年可吸收 30% 以上排放到大气中的 CO_2，滨海湿地占海洋沉积物碳储量的 50% 。③ 开发农业生态系统碳汇潜力。农业仅有 10% 的碳长久保存在各种农产品和土壤中，农业生产的温室气体贡献约 20%[14]；植物固定碳约有 3% 留在陆地上，一般只维持几十年，其余 97% 由植物和土壤再次排放[15]。

人工途径碳固定是通过时空尺度转换，人为直接或间接移除大气 CO_2。包括：① 大气 CO_2 深储岩石圈，如矿化固存、CO_2 注入储油层用于石油开采等。② 化学物理转化利用途径，如甲醇、尿素、塑料、碳氢燃料制品，CO_2 微藻高效固定，以及 CO_2 水泥固化等[16]。塑料较难降解且用途广泛，可能是碳固定潜在途径。③ 农田土壤改良剂途径，如生物炭土壤施用可保持千年左右。④ 开发以木材生物碳为主原料的家具与建筑物等，保存几十年至上百年。⑤ 秸秆等有机废弃物还田，尤其是深施。⑥ 生物碳深储，如岩石圈或水圈或地面封存，显著延长储存周期。

3 农业碳达峰、碳中和思考

3.1 农业碳达峰面临的挑战

工业革命发明了农机、肥药与农膜等是重要的农业生产资料，使农业与化石能源的关系越来越密切，如耕地、播种、灌溉、收获与运输等农业生产环节离不开农机，日光温室等设施种养离开电力就无法运转等，尤其是盛行西方发达国家的“石油农业”。考虑到我国仍然是发展中国家，工业化与城镇化远远落后于欧美发达国家，化石能源不可缺少，新型能源替代时机还远未成熟，不得不面临诸多挑战。① 国家能源碳达峰约束下的未来农业现代化与产业化可持续发展战略与道路选择。到 2030 年不足 8 年，意味着肥药地膜等农业生产资料与农业机械的化石能源消耗即将达到峰值，建立能源提效与替代双轮驱动机制以确保国家粮食安全和推动农业现代化与产业化发展进程。② 农业现代化与产业化发展进程中的“高碳”地板（需求）与“低碳”天花板（达峰）形成上下夹击挑战，而发达国家大都在完成充分发展的基础上开始碳达峰。③ 突破低碳农作核心技术如高氮作物品种，加快推进区域性低碳农作技术体系的试验示范推广迫在眉睫。④ 国家尺度能源途径碳达峰与温室气体碳达峰和两手抓与同步推动。依据联合国粮食及农业组织（FAO）报告，全球尺度的农粮系统温室气体排放量约占总量的 31%，人为因素占 10%—20%，我国 2016 年出现化肥施用量拐点，可以说任重但道已不远。

3.2 农业碳中和面临的挑战

农业碳中和挑战包括：*① 作物秸秆利用与农田土壤固碳挑战。*农作物具有较高初级生产力，农田具有较大的碳通量，但由于农业生产的主要功能是提供食物和能量，限制了农田生态系统碳汇潜力开发。*② 维持森林等生态系统碳汇持续性的挑战。*大气 CO_2 浓度升高相当于施用“碳肥”量增加，激发了森林、湿地、草地、农田与海洋生态系统初级生产力提高[17]，但随着碳肥效逐渐降低，森林等生态系统碳汇将逐渐减少，到达峰值就会出现零碳汇。森林管控具有较大挑战性，如果过多干预，可能导致碳排放（如同农田生态系统）；如果没有干预，在一定时段就会出现上述情况。因此，森林科学管控显得非常重要，并且在全国尺度上保持森林生态系统可持续碳汇功能是一项复杂的巨型系统工程。另外，陆地海洋的不均匀性（如气候带、生态类型等分布）与大气 CO_2 相对均匀性之间的不对称性，高碳汇时空如森林生态系统并没有对应的高浓度大

气 CO_2 分布区，高碳源地区如矿山、工程与城市等往往也不是高碳汇区域，关于森林碳汇潜力还具有不确定性，高效率碳汇机制还有待研究。③ 土地退化与海洋污染碳中和负效应挑战。土地退化的因素很多如盐碱化、污染与土地用途改变等导致生态系统光合能力降低，海洋污染是从陆地开始的江海湖泊水体污染排入海洋导致海洋吸收及其生态系统功能下降。④ 人工途径碳中和挑战。农业范畴的人工途径碳中和主要问题是缺乏核心技术，现有技术成本太高（也可能消耗更多碳），推广应用难度大。

3.3 农业碳中和潜力分析

生物碳在食物链上降解为 CO_2 的过程相对较短，如植物果实与嫩枝叶、肉奶蛋等降解几个至十几个小时，微生物降解几天至几个月不等；木质素和纤维素含量较高的树枝、动物皮毛与骨骼降解几年至几十年。农业生态系统的作物碳（籽粒、蔬菜、水果等）与动物碳（家畜、家禽）生命周期较短，如农作物 1 年左右，家禽仅几个月，大型役用家畜几年至十几年。农业碳（作物碳与动物碳）主要功能是提供生活物质与能量，绝大部分在较短时期内又返回大气圈[18]；时间尺度短，对大气圈 CO_2 浓度增减基本没有影响。生物圈的生物碳普遍具有短命性与不稳定性特征，农业生物碳更是如此。如果不能提高生物碳稳定性或封存，对大气碳减排效应将很有限；而仅仅通过农田土壤实现较大碳汇目标的过程较长，加上土壤耕作导致土壤碳库具有较强的活跃性[19]，土壤固碳难度较大，但潜力不可忽视。秸秆与畜禽粪便等有机废弃物还田是农业碳中和的主要途径，如秸秆还田 20—50 年土壤有机碳持续增加[20]，配合少免耕、休闲与轮作等更好。我国农田表层土壤最大固碳潜力处于 20 亿—30 亿吨之间[21]，生态恢复、管理与重大生态工程有利于碳汇[22]。农作物秸秆转化为生物炭、耐用耐腐材料与能源替代等，如生物炭平均寿命约 2000 年[23]。秸秆经过物理化学处理制作成家具，延长储存期，据估算我国城市系统建筑物和家具的碳储量 2.1 亿吨[24]。开发现代林木加工技术，制作经久耐用的家具、建材或其它用材是高效、便捷、经济的固碳途径。秸秆可转化热能、电能与机械能等替代化石能源。

3.4 农业碳中和误区

碳中和判断依据是减少碳排放（传统能源的节能增效与新能源替代）和增加碳吸收（生物圈碳汇与工业固碳），前者是减少化石能源开采利用，发展替代能源；后者是移除大气 CO_2。生物圈碳汇（自然气候解决方案）是应对温室效应最成熟途径[25]。农业碳中和误区主要表现在：① 有机废弃物还田增加土壤 CO_2 排放违反质量守恒定律。土壤碳源来自生物有机残体与废弃物，降解过程由地表转入土壤，只是改变了降解空间而已。② 秸秆燃烧增加 CO_2 排放。无论秸秆是否燃烧最终都将降解为 CO_2，在碳地质循环尺度下，没有本质差别。③ 食肉（包括奶蛋）增加温室气体排放缺乏科学依据。肉奶蛋是由植物碳通过食物链转换而来的，只是植物碳降解的时空不同而已，这个时空尺度差异相对于大气 CO_2 浓度时空变化可以忽略，最终排放的 CO_2 不增加也不减少。反刍家畜体内排放到大气的 CH_4 稳定性差，最终也将成为 CO_2。④ 提高农作物产量就是碳中和。农作物产量增加是碳中和的必要条件，但并不充分。农作物生物量增长并不会对碳储存有实质贡献，将通过食物网返还大气[26]。只有生物碳储存或封存几十年至百年以上才可认为是碳中和。

3.5 生物圈减排的重要性

生物圈介于岩石圈、水圈与大气圈的交界面，是岩石、水和大气交互的特殊表现形式，可被认为是有生命的岩石、有生命的水或有生命的大气。在物质形态上，生物近似岩石，都是固体；在组成物质上，生物近似水，生物体水分占比大都在 70% 以上，高者达 95% 甚至更多，如人体内的含水量 75% 以上；在化学元素组成上，生物近似大气，生命的基本元素是

碳、氢、氧、氮，大气的主要元素是氮、氧、碳、氢。在生物生命活动视角上，生物圈与大气圈的相似度更高或距离更近；生物圈有机碳可看作是大气圈 CO_2 的固态形式，大气圈 CO_2 也可看作是生物圈有机碳的气态形式。生物圈与大气圈联系纽带是 CO_2，通过生物生命活动（光合与呼吸）完成最重要的碳循环双向路径；光合作用类似于抽水泵，把大气圈 CO_2 转入生物圈；呼吸作用相当于排水渠，又把生物碳以 CO_2 形式返还大气圈。由此可见，如果能使生物碳保持较长周期（对大气 CO_2 浓度产生影响的时间周期），大气 CO_2 减排就有效；反之亦然。生物碳保持较长周期的途径是改性与密封保存，如生物炭等。生物圈控制大气温室效应的总体策略是强化生物碳汇功能，控制碳源途径。因此，生物圈作为碳循环的枢纽，具有碳循环定向调控功能，不但能实现碳中和，更是开启大气负碳循环的密钥。

4 我国农业碳达峰、碳中和应对策略

4.1 农业碳达峰应对策略

我国农业现代化与产业化发展初级阶段决定了农业生产系统的基础设施、生产资料、生产设备、能源及科技等还要持续加大投入，才能满足社会发展需要。① *在农田利用方面*，在发挥高标准农田优势的同时，加快中低产田改造，为农业生产系统提质增效奠定基础，为节肥节药节水节能创造条件，促进农业碳达峰。② *在农业机械装备方面*，我国总体水平较低，农业生产环节机械的智能、物联、网联、信息、精准、“3S”、高效、电控、节能、绿色等方面与欧美发达国家有较大差距，对农业碳达峰支撑不足，应加大投入。③ *在农业农村能源建设方面*，要充分利用农村区域空间优势，发展适合区域特点的太阳能、水能、风能、沼气、秸秆与地热等多能互补及发电技术，升级电力能源设施，减少和降低农业生产与农村生活的化石能源依赖，加快绿色能源替代步伐，为农业碳达峰创造基础条件。

4.2 农业碳中和应对策略

我国人地矛盾突出、资源匮乏、区域差异大、农业产业水平低、农业经营模式多样等决定了农业碳中和任重道远。① *保护林地、草地、湿地等生态系统，倡导植树造林和草地恢复*。近半个世纪，我国增加 10 亿计的树木，全国森林覆盖率达到 23.04%。强化森林火灾预防非常重要，如 2021 年美国加州大山火释放了创纪录的 47 亿吨 CO_2（欧盟 27 个成员国年排放还不到 27 亿吨）。② *预防陆地与海洋污染*。我国正处于全产业上升期，易发生态环境污染，加强点源与面源污染的预防治理，保护流域水环境、海岸与海洋生态系统非常重要。研究表明，海洋吸收人为排放 CO_2 效能与工业革命前相比已损失 31%[27]。③ *开展区域水资源调配*。我国水资源短缺问题突出，严重制约碳中和发展，尤其西北地区。开展南水北调等大型水利工程，为森林、草地、湿地、湖泊等生态系统创造条件，为构建全球碳中和作贡献。④ *加大农田土壤有机质提升力度*。我国农田土壤有机质含量普遍较低，90% 以上的土壤有机碳在每公顷 100 吨以下，表土有机碳密度是欧盟平均值的 70%—75%[28]。农作物秸秆应还尽还，畜禽粪便强制还田，农产品加工废弃物麸皮与渣料等安全还田。多熟种植情况至少一年还田一茬，尽量减少秸秆焚烧，重视秸秆产业化发展（肥料化、饲料化、燃料化、基料化和原料化）。⑤ *发展海洋农业*。科学规划海水养殖和海洋牧场，促进海洋生态系统吸收 CO_2 和发挥渔业碳汇潜能[29]。我国海洋渔业和水产养殖业有望实现年 4.6 亿吨的蓝色固碳量，约相当于 10% 的碳减排量[30]；目前海水养殖面积仅为 204 万公顷，未来渔业产业及碳汇潜力很大[31]。⑥ *升级改造农业生态系统碳中和功能*。从农田划出或配置一定面积的林地、湿地、草地与水塘，构建复合农业生态系统模式，克服传统农田生态结构低碳汇缺陷，北方潜力极大。⑦ *加大农产品减损力度*。

农产品全产业链与消费链的食物损耗与浪费问题突出，我国粮食全产业链总损耗率约 12.3%[32]，蔬菜和水果采摘后平均损耗率高达 25%—30%[33]，城市餐饮每年食物浪费 170万—180 万吨（不包括居民家庭饮食中的食物浪费）[34]。⑧ 科学利用生产生活垃圾。我国农业有机废弃物管理体系与处理设施落后，民众垃圾分类意识不强，厨余垃圾与养殖粪污等数十亿吨资源化利用水平低，环境污染风险增大，通过厌氧发酵与好氧堆肥等途径，能够降低碳汇损失和减少碳源。

4.3 农业碳达峰、碳中和科技创新应对策略

农业碳达峰、碳中和的科技创新应对策略主要有以下几个方面：① 建立国家农业碳达峰、碳中和科技创新驱动体制机制，以管理、科研、产业到应用的全链条推动模式，打造适合国情的“双碳”科技创新体系。② 攻克长期限制我国农业生产的肥、药、水、能、机等核心技术，提升生产与利用效率。③ 研发以生物碳为基础的新型材料，全面提升碳汇-碳源管控水平。④ 探索生物碳深储技术，在百年尺度以上建立碳中和技术体系。⑤ 加强农业碳达峰、碳中和科普，树立“双碳”农业发展理念和强化“双碳”农业发展意识，助推低碳农业转型发展。⑥ 建立大气生态文明理念，推动传统生态文明向大气生态文明转型升级，促进农业碳达峰、碳中和法律法规体系建设。传统生态文明的主要载体是土地，具有明显的区域性特征，如水污染、土地退化与生物多样性减少等；气候变化具有显著的全球性特征，与全人类密切相关，任何国家任何人都无法逃避且必须面对。在生态文明时代，受制于 CO_2 排放约束，传统社会生产模式与生活方式等将受到极大挑战，在科技、经济、法律、道德，甚至是世界地缘格局、国家关系与国际贸易秩序等也将发生重大变化。

5 结语

农业碳达峰、碳中和是“双碳”发展的重要内容之一，对我国实现“双碳”目标具有坚实的支撑作用。农业碳达峰、碳中和面临较大挑战，需要国家管理政策引导，需要科学技术支持，需要更多的民众参与。农业碳达峰需要在生产资料与生产装备方面升级换代，以及能源结构调整等方面加快步伐。农业碳中和需要在生物圈保护、污染防治、区域水资源配置、生态系统功能优化、减少浪费与垃圾处理等方面进一步强化。农业碳达峰、碳中和科技创新需要在体制机制、生物碳基材料开发与深储、法律法规，以及大气生态文明等方面深入研究。

参考文献

1 IPCC. The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

2 IPCC. The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Press, 2021.

3 Drouet L, Bosetti V, Tavoni M. Selection of climate policies under the uncertainties in the fifth assessment report of the IPCC. Nature Climate Change, 2015, 5: 937-940.

4 UNFCCC. Paris Agreement. (2015-12-12)[2022-04-22] https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.

5 IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5℃. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

6 Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 2020, 12: 3269-3340.

7 郭爽. 英国公布2050年实现净零排放战略. (2021-10-22)[2022-04-11] https://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2021/10/365974.shtm.

Guo S. Britain unveils strategy to achieve net zero emissions by 2050. (2021-10-22)[2022-04-11] https://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2021/10/365974.shtm. (in Chinese)

8 方精云. 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 2021, 45(11), 1173-1176.

Fang J Y. Ecological perspectives of carbon neutrality. Chinese

Journal of Plant Ecology, 2021, 45(11), 1173-1176. (in Chinese)

9 王鹤年. 地球化学. 北京: 科学出版社, 1979.
Wang H N. Geochemistry. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)

10 International Energy Agency. CO_2 Emissions from Fuel Combustion. Washington DC: International Energy Agency, 2020.

11 Jones D, Murphyd D, Khalid M, et al. Short-term biochar induced increase in soil CO_2 release is both biotically and abiotically mediated. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8): 1723-1731.

12 Pan Y, Birdsey R A, Fand J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333: 988-993.

13 Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. Nature, 2014, 514: 213-217.

14 FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. Roman: FAO, 2010, doi: 10.4060/ca8753en.

15 Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. Nature, 2019, 575: 87-97.

16 Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. Nature, 2019, 575: 87-97.

17 Liu Y W, Piao S L, Gasser T, et al. Field-experiment constraints on the enhancement of the terrestrial carbon sink by CO_2 fertilization. Nature Geoscience, 2019, 12: 809-814.

18 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学（D辑）: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of carbon sink of Terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000. Science in China: Earth Science, 2007, 37(6): 804-812. (in Chinese)

19 Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(4): GB4026.

20 Qin Z, Huang Y, Zhuang Q. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China. Glob Biogeochemical Cycle, 2013, 27: 711-722.

21 Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304: 1623-1627.

22 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. Science China Life Sciences, 2022, 52(4): 534-574. (in Chinese)

23 Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(2): 210-219.

24 Zhao S, Zhu C, Zhou D, et al. Organic carbon storage in China's urban areas. PLoS One, 2013, 8(8): e71975.

25 Qin Z, Griscom B, Huang Y, et al. Delayed impact of natural climate solutions. Global Change Biology, 2021, 27(1): 215-217.

26 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458: 1009-1013.

27 Zhai W. Quantifying air-sea re-equilibration-implied ocean surface CO_2 accumulation against recent atmospheric CO_2 rise. Journal of Oceanography, 2016, 72(3): 651-659.

28 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展. 核农学报, 2013, 27(5): 681-686.
Li F Y, Liang Y, Wang J F, et al. Biochar to sequester carbon and mitigate greenhouses emission: A review. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2013, 27(5): 681-686. (in Chinese)

29 张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行"海洋负排放"的途径. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 252-258.
Zhang J H, Liu J H, Zhang Y Y, et al. Strategic approach for mariculture to practice "Ocean Negative Carbon Emission". Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252-258. (in Chinese)

30 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68-73.

Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries. China Engineering Science, 2016, 18(3): 68-73. (in Chinese)

31 王莹, 曹俐. 海水养殖的碳汇潜力估算及其经济发展的脱钩分析——以三大沿海地区为例. 海洋经济, 2020, 10(5): 48-56.

Wang Y, Cao L. Estimation of Carbon Sink Potential of Marine Aquaculture and its decoupling from economic development: Taking the three major coastal regions for example. Marine Economy, 2020, 10(5): 48-56. (in Chinese)

32 许世卫. 中国食物消费与浪费分析. 中国食物与营养, 2005, (11): 6-10.

Xu S W. Analysis of food consumption and waste in China. Food and Nutrient in China, 2005, (11): 6-10. (in Chinese)

33 陈军, 但斌. 生鲜农产品的流通损耗问题及控制对策. 管理现代化, 2008, (4): 19-21.

Chen J, Dan B. Circulation loss of fresh agricultural products and control countermeasures. Modernization of Management, 2008, (4): 19-21. (in Chinese)

34 成升魁, 黄锡生, 胡德胜, 等. 科学立法制止餐饮浪费的若干问题——"食物节约立法"专家笔谈. 自然资源学报, 2020, 35(12): 2821-2830.

Cheng S K, Huang X S, Hu D S, et al. Several issues on scientific legislation for prohibiting food waste: Some personal reflections. Journal of Natural Resources, 2020, 35(12): 2821-2830. (in Chinese)

Strategies for Achieving Agriculture Carbon Peak and Carbon Neutrality in China Based on View of Biogeochemical Cycle

YANG Shiqi*　YAN Xin

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract　Biogeochemical cycle is the basic theory of matter (elements) flow among atmosphere, hydrosphere, biosphere and lithosphere, which provides important guidance to achieving the national goal of agriculture carbon peak (ACP) and agriculture carbon neutrality (ACN). As a basic industry, agriculture has large-scale temporal and spatial influence on the greenhouse effect, hence great importance should be attached to ACP and ACN in order to assist the overall strategy of achieving national carbon peak and neutrality. Based on the view of biogeochemical cycle and connotations of ACP and ACN, this article analyzes the paths to achieve ACP and ACN, and discusses the following five aspects: the challenges of ACP, the challenges of ACN, potentials of ACN, misunderstandings of ACN, and biosphere's important role in CO_2 reduction. The article also makes strategy suggestions for realizing our national goal of carbon peak and neutrality from the perspectives of ACP and ACN, as well as science and technology innovation.

Keywords　biogeochemical cycles, agriculture carbon peak, agriculture carbon neutrality, response strategy

杨世琦　中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员，中国农学会耕作制度分会和中国生态学会农业生态专业委员会理事。主要研究领域：农业生态、农业环境和农业清洁生产。E-mail: shiqiyang@126.com

YANG Shiqi　Professor of Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Member of the Farming System Branch of China Association of Agricultural Science Societies; and Member of the Agricultural Ecology Professional Committee of Ecological Society of China. He focuses on the research of agriculture ecology, agricultural environment and agricultural clean production. E-mail: shiqiyang@126.com

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author